

**Exercice 1 : Plasma peu dense - aspect énergétique**

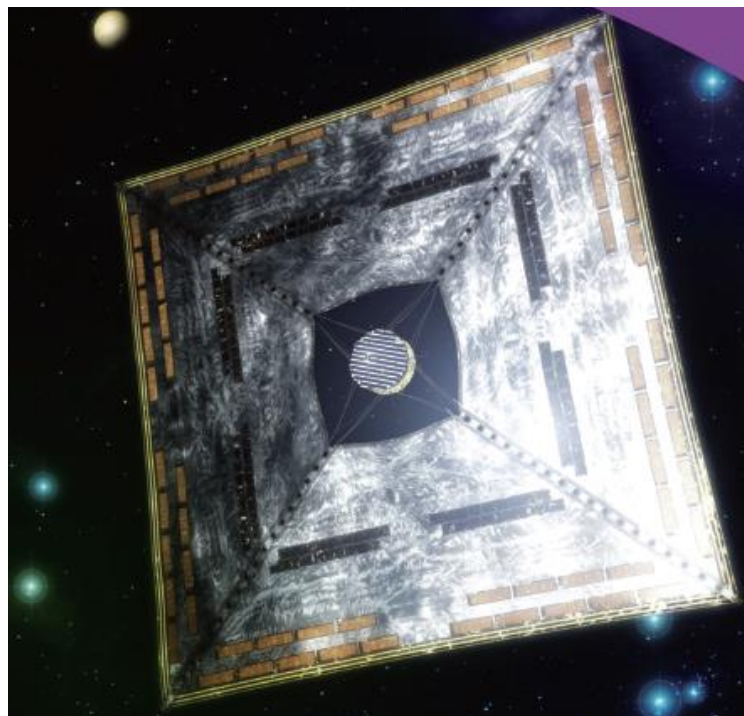
On se place à de fréquences supérieures à la fréquence plasma ; on reprend les expressions trouvées en cours pour le champ électrique, le nombre d'onde et la pulsation plasma.

- Déterminer la valeur moyenne du vecteur de Poynting et mettre en évidence une vitesse de propagation de l'énergie.
- Calculer les valeurs moyennes de la densité d'énergie de l'OEM et de la densité d'énergie cinétique des électrons.
- Montrer alors qu'un bilan d'énergie permet de retrouver la nullité de la valeur moyenne du terme d'interaction matière – rayonnement  $\vec{j} \cdot \vec{E}$ .

**Exercice 2 : Voilier solaire**

La voile solaire IKAROS (photo ci-dessous) a été déployée dans l'espace en 2010 par l'agence spatiale japonaise. Elle mesure environ 200 m<sup>2</sup> et est constituée d'une membrane polyimide de 7,5 μm d'épaisseur ; elle est recouverte de cellules solaires de 25 μm d'épaisseur. Elle a montré pour la première fois l'efficacité du système de propulsion à voile solaire en naviguant autour du soleil pendant 6 mois.

C'est la pression de radiation qui permet cette propulsion ; l'exercice se propose de modéliser cette pression et de discuter les caractéristiques de différentes voiles solaires.



## Questions préliminaires

### Aspect corpusculaire :

On rappelle qu'un photon de fréquence  $\nu$  transporte une énergie  $h\nu$  et une quantité de mouvement  $\frac{h\nu}{c}$ .

Soit  $n^*$  la densité de photons arrivant sur une surface  $S$ . En vous appuyant sur une analogie avec le calcul de la pression cinétique d'un gaz parfait monoatomique, montrer que ce faisceau exerce, sur la surface  $S$ , une « pression de radiation » que l'on exprimera en fonction de  $h$ ,  $\nu$ ,  $n^*$  et  $c$ .

### Aspect ondulatoire :

Réécrire rapidement les expressions du champ électrique et du champ magnétique stationnaires qui s'établissent dans le vide après réflexion sur un métal parfait.

On admet que la force surfacique qui s'exerce sur le métal peut s'écrire  $\vec{f}_S = \frac{1}{2} \vec{j}_S \wedge \vec{B}(0,t)$ , où  $\vec{j}_S$  est la densité de courant surfacique sur le métal.

Montrer que l'on peut, avec ce modèle aussi, mettre en évidence une pression de radiation que l'on exprimera en fonction notamment de  $E_0$ , amplitude du champ électrique incident.

La Terre se situe à la distance  $d = 1,5 \cdot 10^{11}$  m du Soleil, définissant ainsi l'*unité astronomique* (1 UA =  $1,5 \cdot 10^{11}$  m). La puissance surfacique moyenne du rayonnement solaire reçu au niveau de la Terre (en haut de l'atmosphère) est donnée par la constante solaire  $A_0 = 1,36 \cdot 10^3$  W.m<sup>-2</sup>.

Evaluer la pression de radiation ressentie au niveau de la Terre. Commenter.

Le vaisseau Cosmos-1 lancé en 2005 avait une masse de 110 kg et une voile circulaire de 30 m de diamètre fabriquée en mylar. Le vaisseau Ikaros pèse quant à lui 315 kg avec une voile carrée de 14,1 m de côté en polyimide. Déterminer la force de pression de radiation dans chaque cas et évaluer l'accélération de chaque vaisseau. Commenter.

Les sondes Voyager-1 et Voyager-2, lancées en 1977 par la NASA, sont toujours en fonctionnement et se trouvent actuellement aux limites de notre Système Solaire. Avec une vitesse de 60 000 km/h, Voyager-1 est l'objet le plus rapide jamais construit par l'Homme et, depuis 2013, le premier à être sorti de notre Système Solaire après avoir franchi l'héliopause (frontière qui sépare l'héliosphère, où se trouve notre Système Solaire, de l'espace interstellaire) à 120 UA du Soleil.

On cherche à évaluer les performances d'une voile solaire dans un but d'exploration spatiale. On considère un vaisseau de masse totale  $m = 100$  kg muni d'une voile solaire de surface  $S = 1,15 \cdot 10^5$  m<sup>2</sup> (correspondant à un carré de 340 m de côté). La Terre a une masse de  $6,0 \cdot 10^{24}$  kg et le Soleil une masse de  $2,0 \cdot 10^{30}$  kg. On rappelle la valeur de la constante de gravitation universelle  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>.s<sup>-2</sup>.

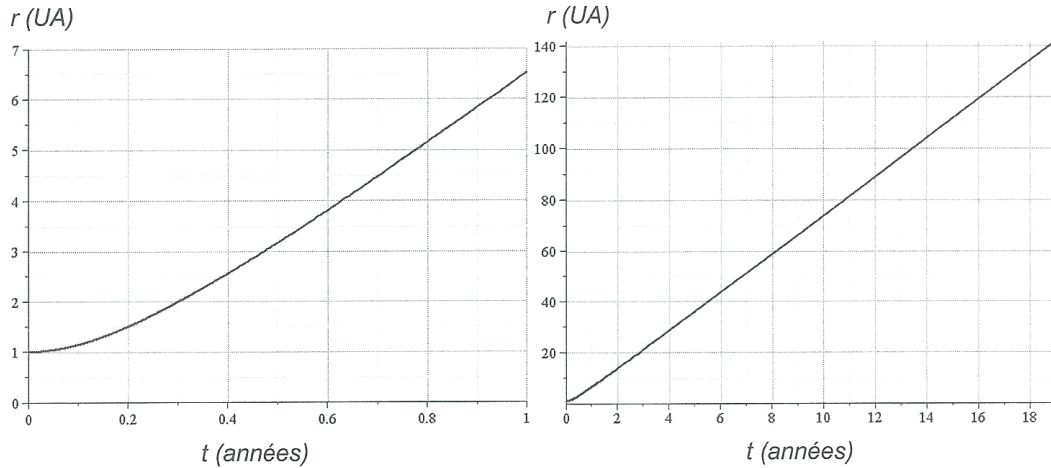
Comparer la force de pression de radiation et les forces de gravitation exercées sur le vaisseau par le Soleil et par la Terre. A partir de quelle distance de la Terre peut-on négliger la force de gravitation terrestre devant celle du Soleil ? On se placera dans cette approximation dans la suite.

Montrer que le mouvement de la voile solaire est rectiligne. En déduire l'équation du mouvement du vaisseau, supposé être lâché sans vitesse initiale depuis la distance  $r = d$  du Soleil, sous la forme :

$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{\alpha}{r^2}$ , où  $\alpha$  est une constante que l'on exprimera en fonction des données.

Montrer que la force subie par le vaisseau dérive d'une énergie potentielle  $E_p$ . Dédurre alors de la conservation de l'énergie mécanique la vitesse maximale  $V_{max}$  que peut atteindre la voile solaire et l'évaluer numériquement. Commenter.

Afin de préciser le mouvement de la voile solaire, on a résolu numériquement l'équation différentielle précédente avec les conditions initiales correspondantes. Le graphe de la distance au Soleil  $r$  (en UA) en fonction du temps  $t$  (en années) est présenté ci-dessous.



17) Commenter les graphes. Au bout de combien de temps le vaisseau croisera-t-il les orbites de Mars (à 1,5 UA du Soleil), de Saturne (9,5 UA) et de Neptune (30 UA) ? Au bout de combien de temps le vaisseau sera-t-il sorti du Système Solaire ? Evaluer sa vitesse maximale. Conclure.